Hans Journal of Civil Engineering 土木工程, 2026, 15(11), 11-17
Published Online November 2026 in Hans. https://www.hanspub.org/journal/hjce
https://doi.org/10.12677/hjce.2026.1511253

Hans汉斯

基于小波软硬结合阈值降噪的混凝土坝地震响应信号处理方法

李小奇[1,2]，黄　灿[1]，孙俊俊[1]

[1]滁州学院智能建造与水利工程学院，安徽　滁州
[2]桥梁结构数据诊断与智慧运维国际联合研究中心，安徽　滁州

收稿日期：2026年10月10日；录用日期：2026年11月1日；发布日期：2026年11月11日

摘　要

混凝土坝地震响应信号是开展坝体动力特性分析与抗震安全评估的核心基础，实测信号在采集过程中易受环境干扰、设备噪声等影响混入大量噪声成分，直接制约了信号分析与结构状态识别的精度。小波阈值降噪是信号降噪的常用方法，但传统硬阈值函数存在间断点、软阈值函数存在固定估计偏差，难以满足地震响应信号高精度处理的需求。针对传统小波阈值方法的不足，本文提出基于软硬结合阈值的小波降噪方法，并将其应用于混凝土坝地震响应信号处理。验证结果表明，该方法降噪效果优于传统软、硬阈值方法，能够有效提升信号信噪比与重构精度，可为混凝土坝地震响应信号处理提供可靠的技术支撑。

关键词

混凝土坝，小波降噪，软硬结合阈值，信噪比，均方根误差

Signal Processing Method for Seismic Response of Concrete Dams Based on Wavelet Soft-Hard Combined Threshold Denoising

Xiaoqi Li[1,2], Can Huang[1], Junjun Sun[1]

[1]College of Civil and Architectural Engineering, Chuzhou University, Chuzhou Anhui
[2]Anhui Provincial International Joint Research Center of Data Diagnosis and Smart Maintenance on Bridge Structures, Chuzhou Anhui

Received: October 10, 2026; accepted: November 1, 2026; published: November 11, 2026

文章引用: 李小奇, 黄灿, 孙俊俊. 基于小波软硬结合阈值降噪的混凝土坝地震响应信号处理方法[J]. 土木工程, 2026, 15(11): 11-17. DOI: 10.12677/hjce.2026.1511253

Abstract

Seismic response signals constitute the fundamental basis for dynamic characteristic analysis and seismic safety evaluation of concrete dams. Field-measured signals are prone to be mixed with substantial noise induced by environmental interference and equipment noise during acquisition, which severely limits the accuracy of signal analysis and structural state identification. Wavelet threshold denoising is a widely adopted technique for signal denoising. However, the conventional hard threshold function suffers from discontinuities, and the soft threshold function has inherent estimation bias. Neither can satisfy the high-precision processing requirements of seismic response signals. To address these drawbacks of traditional wavelet thresholding methods, this paper proposes a wavelet denoising method based on a soft-hard combined threshold and applies it to seismic response signal processing of concrete dams. Verification results indicate that the proposed method achieves superior denoising performance compared with traditional soft and hard threshold approaches. It can effectively increase the signal-to-noise ratio and reconstruction accuracy, thereby offering reliable technical support for seismic response signal processing of concrete dams.

Keywords

Concrete Dam, Wavelet Denoising, Soft-Hard Combined Threshold, Signal-to-Noise Ratio, Root Mean Square Error

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).
http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Open Access

1. 引言

混凝土坝是水利枢纽体系中的核心挡水建筑物，其抗震安全性能直接关系到流域防洪安全与下游公共安全。强震监测采集的坝体地震响应信号，是解析坝体动力特性、识别结构损伤状态、开展抗震安全评估的核心数据基础。受现场监测环境干扰、采集设备固有噪声及信号传输误差等多重因素影响，实测地震响应信号通常混杂大量随机噪声成分，导致坝体真实振动特征被掩盖，进而降低后续模态参数辨识、结构响应分析的准确性。因此，研究适配混凝土坝地震响应信号特征的高精度降噪方法，对提升工程抗震分析的可靠性具有重要的现实意义[1] [2]。

小波变换凭借良好的时频局部化特性，在非平稳信号处理领域展现出显著优势，基于小波变换的阈值降噪方法因计算简便、实现高效，成为目前工程信号降噪中应用最为广泛的技术路径之一。但传统小波阈值方法存在固有缺陷：硬阈值函数在阈值点处存在间断，易导致重构信号出现局部振荡畸变；软阈值函数虽具备全局连续性，但处理后的小波系数与真实信号系数之间存在恒定偏差，容易造成信号细节特征的流失，二者均难以在噪声抑制与有效特征保留之间达到最优平衡。针对传统阈值方法的不足，本文对小波阈值函数开展优化研究，提出软硬结合阈值的小波降噪方法，并将其应用于混凝土坝地震响应信号处理，通过对比验证分析方法的降噪性能，为工程地震信号的高精度处理提供新的方法参考。

2. 基于软硬结合阈值(HSF)的小波降噪

2.1. 小波系数的阈值处理

假设待分解的含噪信号为 $f(k)$，$x(k)$ 为原始信号，$y(k)$ 为白噪声且服从 $N(0,\sigma^2)$ 分布。假设 $f(k)$

为 $f(t)$ 的离散采样数据，则观测信号可以表示为：

$$f(k)=x(k)+y(k) \tag{1}$$

选择合适的基函数和小波分解的层数 j，将含噪信号分解到 j 层，可以得到各层的小波系数。小波的正交变换分解公式为：

$$\begin{cases} c_{j,k}=\sum_n c_{j-1,n}h_{n-2k} \\ w_{j,k}=\sum_n w_{j-1,n}g_{n-2k} \end{cases} \quad k=0,1,2,\cdots,n-1 \tag{2}$$

式中，$c_{j,k}$ 为尺度系数，$w_{j,k}$ 为小波系数，h、g 为正交镜像滤波器，n 为离散采样点。

因为小波变换是线性的，对含噪信号 $f(k)$ 做离散小波变换之后，得到的小波系数 $w_{j,k}$ 仍由 $x(k)$ 对应的真实信号部分 $u_{j,k}$ 和 $y(k)$ 对应的噪声信号部分 $v_{j,k}$ 组成。

对高于阈值的 $w_{j,k}$ 进行处理时通常有软阈值和硬阈值两种方法。假设阈值为 λ，则在小波系数 $w_{j,k}$ 小于阈值时，认为 $w_{j,k}$ 主要成分为噪声，予以舍弃；在小波系数 $w_{j,k}$ 大于 λ 时，认为 $w_{j,k}$ 的主要成分为信号，予以保留(硬阈值法)或者按照某种规则趋近于零(软阈值法)：

$$\text{硬阈值：}\ \bar{w}_{j,k}=\begin{cases} w_{j,k} & |w_{j,k}|\geq\lambda \\ 0 & |w_{j,k}|<\lambda \end{cases} \tag{3}$$

$$\text{软阈值：}\ \bar{w}_{j,k}=\begin{cases} \operatorname{sign}(w_{j,k})(|w_{j,k}|-\lambda) & |w_{j,k}|\geq\lambda \\ 0 & |w_{j,k}|<\lambda \end{cases} \tag{4}$$

$$\text{半软阈值：}\ \bar{w}_{j,k}=\begin{cases} 0 & |w_{j,k}|\leq\lambda_1 \\ \operatorname{sign}(w_{j,k})\dfrac{\lambda_2(|w_{j,k}|-\lambda_1)}{\lambda_2-\lambda_1} & \lambda_1<|w_{j,k}|\leq\lambda_2 \\ w_{j,k} & |w_{j,k}|>\lambda_2 \end{cases} \tag{5}$$

2.2. 基于 HSF 的小波去噪

在小波去噪中，不同尺度的去噪阈值呈折线递减。根据李氏指数理论，随机分布的白噪声信号的均一李氏指数可表示为 $-0.5-\varepsilon(\varepsilon>0)$，即噪声的小波变换模值的上界是符合指数变化的。小波阈值去噪的关键在于对小波系数的估计[3] [4]。因此，戴朝华等[5]提出了一种新的小波阈值去噪方法——半硬阈值：

$$\bar{w}_{j,k}=\begin{cases} w_{j,k} & |w_{j,k}|\geq\alpha \\ \dfrac{a}{b}(W_{j,k}-b_L) & |w_{j,k}|<b_L \\ 0 & b_L\leq|w_{j,k}|<\alpha \end{cases} \tag{6}$$

根据 3σ 准则，当 $\alpha=3\lambda$，$b_L=(0.5\sim1.5)\lambda$ 时，$\bar{w}_{j,k}$ 取得较优值。这个函数对硬阈值函数进行了改进，即当 $|w_{j,k}|\geq\alpha$ 和 $|w_{j,k}|<b_L$ 时，阈值函数与硬阈值一致，而在 $b_L\leq|w_{j,k}|<\alpha$ 范围时，比硬阈值函数连续性更好。不过，半硬阈值在 $|w_{j,k}|\geq\alpha$ 时，仍然不连续，且参数的选取也存在问题。

对于软阈值法所得到的小波系数 $\bar{w}_{j,k}$，与 $w_{j,k}$ 总存在固定的偏差 λ，这会直接影响到信号的重构和对于真实信号的逼近程度，因此要设法降低这个偏差。而硬阈值法不仅在 λ 处不连续，直接将软阈值的偏差直接归零也需要斟酌。为了解决上述不连续的问题，本文将半硬阈值法与软阈值法相结合，形成了一

种新的阈值函数：

$$\tilde{w}_{j,k}=\begin{cases} W_{j,k}-\alpha\lambda+\dfrac{\alpha\lambda}{1+\exp\left(\dfrac{-W_{j,k}+\alpha}{\lambda}\right)} & \left|w_{j,k}\right|\geq a \\ 0 & \left|w_{j,k}\right|<b_L \\ \dfrac{a}{a-b_L}\left(W_{j,k}-b_L\right) & \text{其他} \end{cases} \tag{7}$$

式中，α 为[0, 1]之间的数。这个函数在小波域内连续，并且在$\left|w_{j,k}\right|\geq\alpha$时高阶可导。假定 $a=b=\lambda$，当 α 取 0 时，式(7)的小波转换系数等同于硬阈值法；当 α 取 1 时，小波转换系数的求取等同于软阈值法；当 $0<\alpha<1$时，小波转换系数 $\tilde{w}_{j,k}$ 与小波系数 $w_{j,k}$ 之间的差值趋向于 $\alpha\lambda$，由于 $\alpha<1$，因此这种方法产生的偏差小于软阈值法的偏差，而 α 的取值决定了去噪效果的优劣。

2.3. 阈值函数对比分析

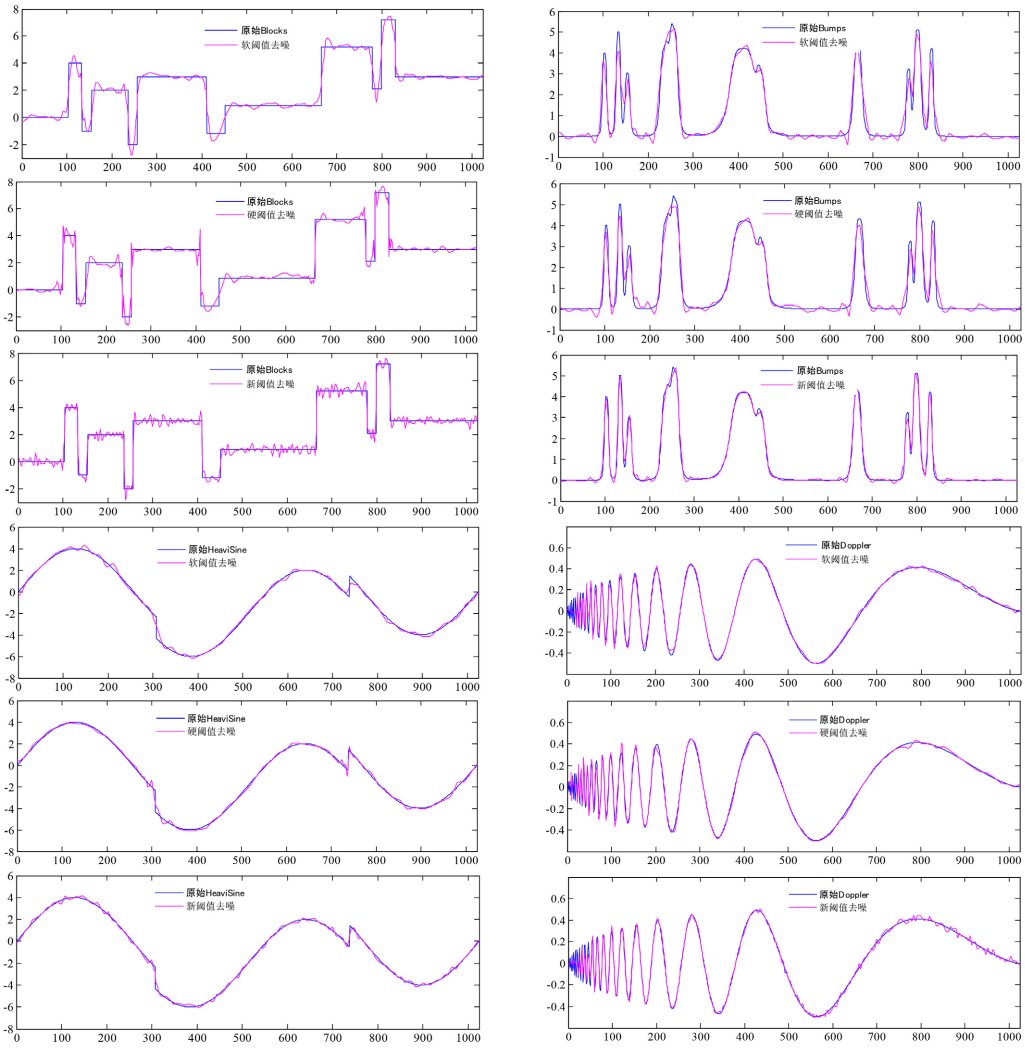


Figure 1. Denoising effects of different threshold methods
图 1. 不同阈值去噪方法效果对比

为了验证 HSF 方法的有效性，我们利用 4 种经典的测试信号——Blocks、Bumps、HeaviSine、Doppler 信号进行去噪效果对比，同时比较的有常用的软阈值和硬阈值函数，新阈值方法的 α 值通过自适应来调节取值。信号样本点取 $n=1024$，含噪信号的信噪比 SNR = 15 dB，小波基选取“sym4”，分解层次 $c=4$，评价指标有 SNR 值和 RMSE 值。

Table 1. SNR of different denoising methods
表 1. 不同去噪方法 SNR 值比较

信号	软阈值法(SF)	硬阈值法(HF)	结合阈值法(HSF)
Blocks	12.7608	15.2396	**16.3524**
Bumps	13.5048	18.2608	**19.6583**
HeaviSine	24.1271	25.8581	**26.6685**
Doppler	21.3647	21.6114	**22.1567**

Table 2. RMSE of different denoising methods
表 2. 不同去噪方法 RMSE 值比较

信号	软阈值法(SF)	硬阈值法(HF)	结合阈值法(HSF)
Blocks	0.4558	0.3427	**0.3015**
Bumps	0.3101	0.1880	**0.1601**
HeaviSine	0.1846	0.1513	**0.1378**
Doppler	0.0247	0.0240	**0.0225**

由上述图表(图 1、表 1~2)可以看出，HSF 方法对于 4 种典型信号的去噪效果均优于传统的 SF 和 HF 方法，虽然在部分信号去噪中效果不明显，但大体趋势上的 SNR 和 RMSE 是稳定提升的。需要注意的是，小波阈值去噪效果的好坏决定于阈值的选取，而阈值的计算是由小波基的选取和分解层次决定的[6]。

3. 实验分析

3.1. 工程概况

Table 3. Typical strong earthquakes of a gravity dam (2003~2009, monolith No. 19)
表 3. 某重力坝典型强震概况(2003 年~2009 年，19#坝段)

地震时间	发生地点	地震震级	最大加速度(m/s^2)	最大加速度发生台站	最大加速度对应测点
2007-03-13	南平顺昌	4.6 级	0.22684	S05 北南向	SE4 垂直
2007-10-16	南平	3.8 级	0.32379	S04 东西向	SE1 顺河
2007-10-16	古田	3.6 级	0.36564	S04 东西向	SE1 顺河
2007-10-24	古田	3.4 级	0.10059	S04 东西向	SE1 顺河
2008-03-06	古田	4.8 级	0.68598	S04 东西向	SE1 顺河
2009-03-23	平潭	3.8 级	0.32379	S04 东西向	SE1 顺河

某水电站位于福建闽江干流，坝体为混凝土重力坝，最大坝高 101 m，坝顶宽 16 m，坝顶长 783 m，正常蓄水位 65 m，校核水位 67.7 m，库容 26 亿 m^3。结构主要包括坝体、电厂、船闸和升船机等，其平面布置如图 2 所示。大坝临近海峡强地震带，最需要对坝体和升船机等结构进行抗震监测，根据结构在震动下的反应特征，选取 19#和 25#坝段作为典型坝段来布置强震仪，在坝顶与坝基部位布置三分向拾振

器(垂直、顺河与横河向)。大坝按照 7 级抗震烈度进行设计，从 2003 年到 2009 年，大坝共经历 3 级以上地震 23 次，最大震级达到 4.8 级，典型地震见表 3。

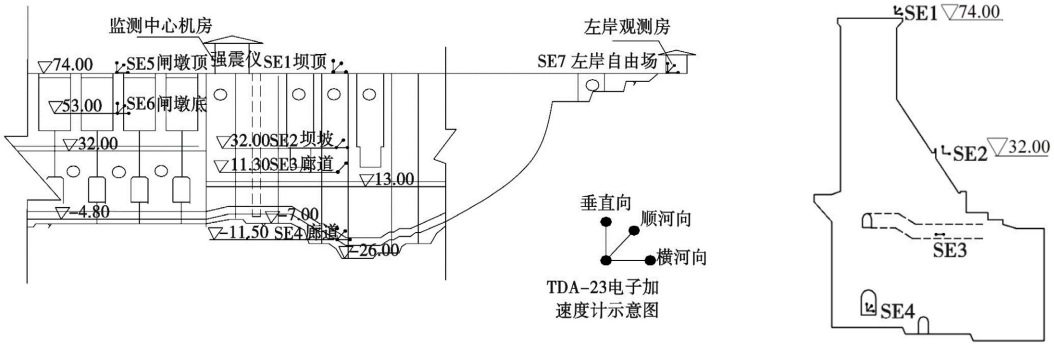


Figure 2. Layout of strong-motion observation points and vibration pickups in monolith No. 19
图 2. 某大坝强震测点及 19#坝段拾振器布置图

3.2. 降噪效果分析

由表 3 可知，19#断面强震最大加速度主要发生在 SE1 测点顺河向，于是我们针对 2008 年 3 月 6 号强震发生时 SE1 测点顺河向的含噪信号进行处理，分析一下不同去噪方法的效果，结果如图 3 及表 4 所示，表 4 中的 $\overline{\text{SNR}}$ 值是进行归一化后与 SE2 测点之间的相关性计算值，测点 $N=2$。

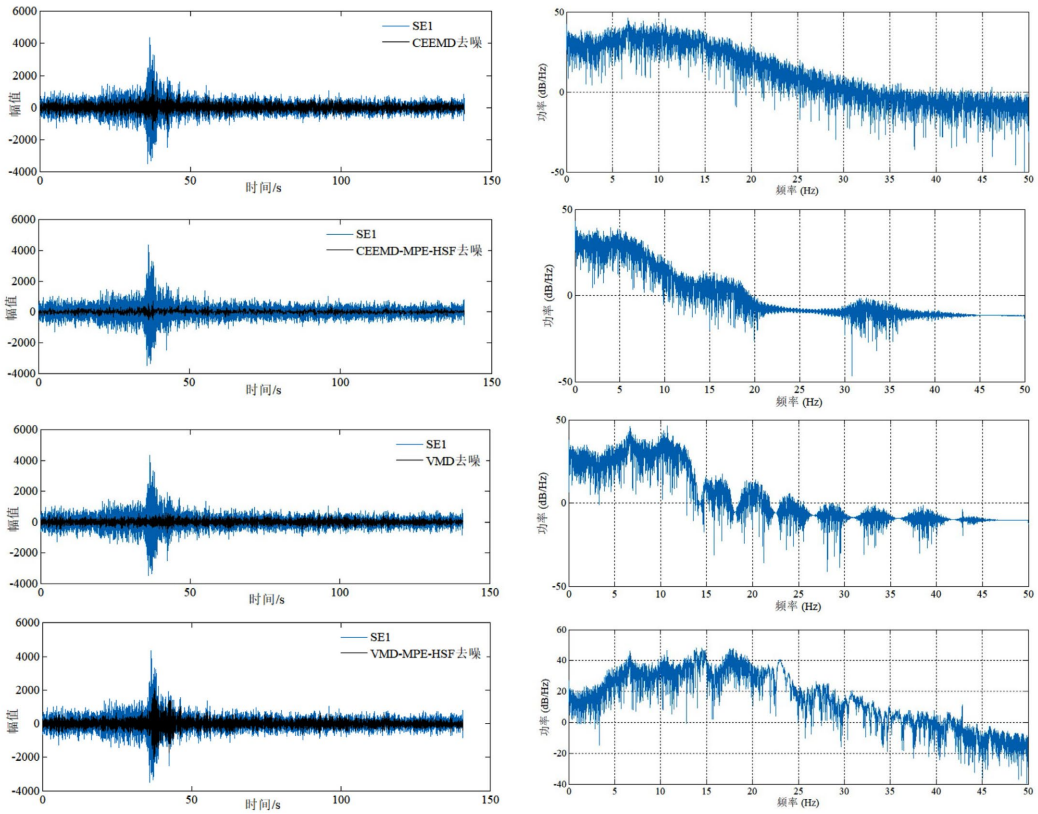


Figure 3. Denoised fitting and power spectra of the streamwise acceleration signal at SE1
图 3. SE1 顺河向加速度信号降噪拟合与功率谱对比

Table 4. Estimated SNR values of different denoising methods at SE1
表 4. SE1 测点不同降噪方法估计信噪比

	CEEMD	CEEMD-HSF	VMD	VMD-HSF
$\overline{\text{SNR}}$	1.3730	1.4349	1.5422	**1.6321**

由上述图表可以发现，VMD-HSF 方法的去噪效果最好，与相邻测点的相对 $\overline{\text{SNR}}$ 值最高；HSF 法针对高频噪声的滤波效果较好，说明响应信号受环境噪声影响较大；CEEMD 方法没有考虑高频 IMF 分量中的有效信息，并且因为添加白噪声的缘故，导致滤波效果相对较差[7]；由于 SE1 测点信号的模态叠加效果明显，利用 CEEMD 计算得到的阶数推导 VMD 算法时的精度更好，说明在高阶滤波时回收了过多噪声信号。综上所述，本文提出的 HSF 方法是有效的，并且在模态叠加明显时，VMD 方法更优。

4. 结论

针对传统小波阈值降噪方法中硬阈值函数存在间断点、软阈值函数存在固定估计偏差的固有缺陷，本文提出了一种软硬结合阈值的小波降噪方法，并将其应用于混凝土坝地震响应信号的降噪处理。所构建的软硬结合阈值函数在小波域内全局连续且高阶可导，可通过调节参数在硬阈值与软阈值特性之间实现平滑过渡，在保留小波阈值降噪计算高效优势的同时，有效改善了传统阈值函数的数学特性，降低了信号重构的估计偏差。经典型测试信号与混凝土坝实测地震响应信号验证，相较于传统软阈值、硬阈值方法，该方法能够有效提升输出信号的信噪比，减小信号重构误差，更完整地保留地震响应中的动力特征信息，具备更优的综合降噪效果。

本文提出的方法为混凝土坝地震响应信号的高精度预处理提供了新的技术路径，对提升坝体动力特性分析与抗震安全评估的准确性具有积极的工程应用价值。后续可进一步围绕阈值参数的自适应选取机制开展研究，结合信号特征实现阈值的动态优化，同时探索该方法与多尺度信号分解方法的融合应用，进一步拓展其在复杂工程振动信号处理中的适用范围。

基金项目

论文依托于滁州学院 2023 年度安徽省高校自然科学研究项目(2023AH051615)，滁州学院 2023 年度校级科研启动基金资助项目(2023qd54)，滁州学院 2025 年度大学生创新创业训练计划项目(S202510377095)。

参考文献

[1] 盛金保, 向衍, 杨德玮, 等. 水库大坝安全诊断与智慧管理关键技术与应用[J]. 岩土工程学报, 2022, 44(7): 1351-1366.

[2] 何宁, 李登华, 陈鸽, 等. 土石坝安全监测数据处置与评价技术研究进展[J]. 水利水运工程学报, 2025(5): 88-100.

[3] 沙磊. 一种新小波阈值算法的变形监测数据去噪方法[J]. 大地测量与地球动力学, 2023, 43(8): 847-850.

[4] 张建伟, 江琦, 赵瑜, 等. 一种适用于泄流结构振动分析的信号降噪方法[J]. 振动与冲击, 2015, 34(20): 179-184.

[5] 戴朝华, 朱云芳, 陈维荣. 一种新的小波消噪阈值选取方法[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2005(6): 33-35.

[6] 欧斌, 张才溢, 陈德辉, 等. 基于 EMD-小波阈值-LSTM 模型的混凝土坝变形预测[J]. 排灌机械工程学报, 2025, 43(4): 379-386.

[7] 石佳晨, 岳春芳, 朱明远, 等. 基于 CEEMDAN-改进小波阈值的大坝变形数据处理方法[J]. 水利水电科技进展, 2024, 44(5): 80-86, 102.